文章编号:2096-1472(2023)09-0001-07

DOI:10.19644/j.cnki.issn2096-1472.2023.009.001

基于可穿戴压力传感器的跌倒检测研究综述

郭天宏,万蓬勃,石玉娇

(陕西科技大学设计与艺术学院,陕西 西安 710021)⊠ tinasuse@163.com; Wanpengbo@yeah.net; syj13892681635@163.com



摘 要:跌倒是老年人因伤害死亡的主因之一,在跌倒后第一时间施救可以减轻跌倒事件导致的严重后果。同时,随着微机电技术的发展,基于可穿戴设备的跌倒检测研究逐渐成为学者关注的焦点。为了系统梳理基于可穿戴 压力传感器的跌倒检测研究进展,首先以人体足部生理结构为基础,分析可穿戴压力传感器作用于跌倒检测的原理 与特点;其次基于跌倒检测系统框架,详细综述了压力传感器的设置和系统集成方法、压力数据的特殊处理方法以 及跌倒检测模型的不同判断方法;最后对已有研究成果进行分类和对比分析,为后续研究提供借鉴和参考。

关键词:可穿戴设备;压力传感器;跌倒检测

中图分类号:TP181 文献标志码:A



Review of Fall Detection Research Based on Wearable Pressure Sensor

GUO Tianhong, WAN Pengbo, SHI Yujiao

(School of Art and Design, Shaanxi University of science and Technology, Xi'an 710021, China) ⊠ tinasuse@163.com; Wanpengbo@yean.net; syj13892681635@163.com

Abstract: Falls are one of the main causes of death in the elderly due to injuries, and immediate rescue after falls can alleviate the serious consequences caused by falls. Meanwhile, with the development of micro-electro-mechanical technology, research on fall detection based on wearable devices has gradually become the focus of scholars. In order to systematically review the research progress of fall detection based on wearable pressure sensors, this paper firstly proposes to analyze the principle and characteristics of wearable pressure sensors acting on fall detection based on the physiological structure of the human foot. Secondly, based on the framework of the fall detection system, a detailed overview is given of the setting and system integration methods of pressure sensors, special processing methods of pressure data, and different judgment methods of fall detection models. Finally, existing achievements are classified and compared, which provides reference for subsequent research.

Key words: wearable device; pressure sensor; fall detection

0 引言(Introduction)

第七次人口普查数据显示:2020年我国 65岁及以上人口 已经占到总人口的 13.50%,人口老龄化问题日趋严重^[1]。跌 倒是老年人因伤害死亡的第一原因,有研究表明:2020年我国 60岁以上老年人中,因跌倒而死亡的人数占到了因伤害死亡 人数的 39.34%^[2]。跌倒检测是区分人体的日常生活活动 (Activities of Daily Living, ADL)与跌倒事件并快速感知报 警,以缩短跌倒者获救时间的一项技术,该技术在老年人日常

监护中起到了重要作用且具有重要意义。

目前,比较常用的跌倒检测方法类型有可穿戴式、图像感知式和环境感知式等。可穿戴式的跌倒检测方法基于微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS),将传感器放置于衣服、鞋帽等服装或服饰品中获取人体数据并检测跌倒行为。此方法由于传感器的种类多、制造成本低,系统整体的数据计算量小,设置和操作简单,因此成为当前跌倒检测领域使用的主流方法^[34]。

由于足底压力可以反映人体足部和下肢的运动变化,进而 对人体运动状态和姿势做出判别,因此可将压力传感器放在足 底测量压力数据,它具有侵入性小、便捷性高的特点,相比惯性 传感器等类型的可穿戴传感器的优势更明显。本文对基于可 穿戴压力传感器的跌倒检测研究进行综述,并详细对比和分析 了相关研究成果。

1 足底压力与跌倒检测(Plantar pressure and fall detection)

1.1 足部构造与足底压力分布

人体足部结构复杂,主要由骨骼、关节、肌肉、肌腱及韧带 等部分组成,各个部分之间复杂密切的配合是人体完成行走等 ADL的基础^[5]。其中,足弓是由跗骨、跖骨、韧带和肌腱共同 组成的一个凸向上方的弓形结构,该结构可以吸收足部受到的 冲击力,分散人体重量,帮助身体完成站立、行走和跑步等动 作。趾骨短小且灵活,起到了调节人体平衡的关键作用。人体 足部骨骼与足弓结构如图 1(a)和图 1(b)所示。

足底压力是指足底受到地面的反作用力,根据特殊的足部 生理结构,跖骨、跟骨以及大脚趾区域是足部与地面主要接触 的区域,对这三个区域压力值的变化情况进行分析,即可得到 人体运动状态^[6-7]。图 1(c)为 JASENCO 足底压力测量分析系 统测得的静态足部压力图,从图 1(c)中可以看出:足底压力主 要分布在大脚趾、跖骨和后跟区域,与上文所述足部生理结构 的分析结果一致^[8]。



1.2 跌倒行为分析

跌倒是指"突发、不自主的、非故意的体位改变,倒在地上 或更低的平面上"^[9]。通常,跌倒的过程分为失重、撞击和静止 三种状态(图 2)^[10-11]。以跌倒过程中腰部惯性数据和足底压 力数据的变化为例,对失重、撞击和静止三种状态进行分析,图 2 中显示的加速度以一个重力加速度 g 为单位,压力数据则计 算为足底压力与站立状态下最大压力的比值,以百分数形式 给出。

(1)失重:人体在刚出现跌倒动作时,身体会逐渐倾斜并在 重力的作用下向下坠落,双足逐渐与地面脱离接触,此时处于 失重状态。在此过程中,竖直方向速度逐渐增大,加速度由重 力加速度逐渐减小并趋于0,同时足底压力减小。

(2)撞击:在失重状态出现后,人体与地面瞬间发生碰撞, 双足通常会产生小幅摆动。在此状态中,人体速度瞬间减小至 0,加速度产生较大峰值并迅速恢复至重力加速度,足底压力值 在0附近小幅摆动。

(3)静止:一般情况下,人体在撞击状态后的较短时间内会 保持躺倒状态。在此状态下,人体保持一种相对静止的状态, 加速度和足底压力均无较大变化。



从图2可以看出,基于惯性传感器的跌倒检测,通常以跌 倒过程中产生的高加速度和角度变化等作为区分依据,可以区 分跌倒的失重、撞击和静止三种状态;而基于可穿戴压力传感 器的跌倒检测,对于以上跌倒的三种状态区分不是很明显,通 常是根据跌倒前后足底压力的不同分布检测跌倒活动。

1.3 传感器种类和位置分析

在以往的可穿戴跌倒检测研究中,使用最多的传感器是惯 性传感器(加速度计、陀螺仪、倾角仪等),通常放置在人体的躯 干位置(腰部、背部等)。已有研究表明,在人体躯干位置设置 惯性传感器缺乏对人体下肢运动的判别,容易误判一些类似跌 倒的动作,如坐下、蹲下等^[12-16]。目前,不少研究者将目光聚焦 于通过在足底设置压力传感器检测跌倒活动,此方式主要有以 下几个特点。

(1)除躺的动作外,人体大部分 ADL 均基于足部与地面的 间接或直接接触,这类接触会产生足底压力,所以可以通过检 测足底压力的变化判断人体双脚与地面的接触状态。针对跌 倒动作,足底压力数据是短时间内从有到无的变化;针对走、跑 和上下楼梯,足底压力数据是周期性的数值大小变化;针对站、 坐、躺的不同姿势,压力数据是数值大小的明显变化。

(2)惯性传感器通常放置在腰带或者衣物上,这样放置较为显眼,老年人可能会有心理上的负担,同时需要自行佩戴,容易遗忘,也存在放置不稳定的问题^[11,17-18]。鞋、鞋垫等制品是 老年人日常出行所必需的,新型的薄膜压力传感器与其结合是 一个较好的穿戴解决方案^[19-21]。

(3)足部位置的特殊性导致足底压力对于上肢运动的感知 不够,而对于足部和下肢的感知却很灵敏。一些下肢运动,如跷 二郎腿、腿交叉、盘腿和抖动等动作出现频率大且模拟难度大的 问题,对跌倒检测的算法设置和实际应用造成了一定的困难。

1.4 跌倒检测系统框架

如图 3 所示,基于可穿戴设备的跌倒检测系统主要由数据 采集、数据处理、跌倒检测模型、报警模块等部分组成^[22]。

Fig. 3 Framework of wearable fall detection system

2 数据采集(Data acquisition)

基于可穿戴压力传感器的数据采集系统包括压力传感器、 数据传输模块、主控芯片和电池模块等。人体足部具有一定的 特殊性,因此压力传感器型号、数量和放置位置的选择是必须 考虑的重点,同时基于可穿戴的要求,各模块的集成也需要重 点考虑。本节从传感器的型号参数、数量、位置以及各模块的 集成进行分析说明。

2.1 传感器类型和参数

常见的压力传感器可根据工作原理划分为三种类型:压电 式传感器、压阻式传感器和电容式传感器,其性能比较如表1 所示^[23-25]。

表1 常见压力传感器的性能比较

Tab.1 Performance comparison of common pressure sensors

| 类型 | 工作原理 | 优点 | 缺点 |
|-----|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 压电式 | 传感器形变, 表面产生电荷 | 灵敏度高,结构 简单,信噪比高 | 静态测量有限, 存在压力漂移 |
| 压阻式 | 传感器形变, 电阻率发生 变化 | 操作简单,成本 低,适用于动态 和静态测量 | 信噪比低,温度 性能差 |
| 电容式 | 传感器形变, 电容发生变化 | 重复性好,结构 简单,功耗低, 动态性能好 | 灵敏度低,成本 高,结构复杂, 对湿度敏感 |

考虑足底压力的动态和静态转换频繁、鞋腔内部的温度和 湿度变化差异、测量精度和成本等因素,基干可穿戴压力传感 器的跌倒检测研究常使用压阻式传感器、同时基于可穿戴的要 求,Interlink Electronics 公司生产的速模式力传感电阻器 (Force Sensing Resistors, FSR)被很多研究者使用。FSR 是一 种聚合物厚膜(Polymer Thick Film, PTF)器件,其电阻随着施 加到有源表面力的增加而减小,可用于电子设备的人体触摸控 制(如图 4 所示)^[26]。其中,FSR402 和 FSR400 两款压力传感 器最受研究者青睐,它们的区别在于尺寸和厚度不同,具体参 数如表 2 所示^[26]。





| 表 2 | FSR402 与 FSR400 参数对比 |
|-----|----------------------|
| | |

Tab.2 Comparison of parameters between FSR402 and FSR400

| 参数 | FSR402 | FSR400 | |
|-------------|--------------------|--------------------|--|
| 有效区域尺寸/mm | φ12.7 φ5.0 | | |
| 传感器厚度/mm | 0.46 0.30 | | |
| 压力灵敏度范围/N | 1~100 1~100 | | |
| 压强灵敏度范围/psi | 1.5~150 | 1.5~150 | |
| 重复性/% | $\pm 2 \sim \pm 5$ | $\pm 2 \sim \pm 5$ | |
| 耐受力次数/次 | 大于 10 000 000 | 大于 10 000 000 | |
| 温度范围/℃ | $-30 \sim 70$ | $-30 \sim 70$ | |

2.2 传感器数量和位置

王明鑫等^[27]的研究表明:中国正常的成年人双侧足的足 底压力分布以及不同性别的足底压力的分布无显著性意义。 在跌倒检测研究中,研究者们根据不同的检测思路,采用了不 同的放置方案(图 5)。本文按照单足可放置传感器的数量 (*N*),给出了三种压力传感器放置方案,即 *N*>8:整足式;4≪ *N*≪8;关键点式;1≪*N*<4:简单式。



Fig. 5 Sensor quantity configuration scheme

2.2.1 整足式

整足式放置的目的是尽量测量足底每个部位的压力大小, 从而得到精准的压力分布,进而用于检测跌倒活动,因此需要 的传感器数量多[图 5(a)]。在文献[13]、文献[28]至文献[30] 中,传感器以整足式的方式放置,传感器数量为 11~512 个。 JIA 等^[28]使用自制的柔性压力传感鞋垫测量人体足底压力,鞋 垫由 512 个电容测压单元组成,排列成 32 行 16 列。

整足式放置方案经常用于跌倒风险的预警,通过分析压力 数据,可以获得较为精准的步态参数,进而评估人体的跌倒风 险,指导跌倒预防。在以跌倒检测为目标的研究中,并不需要 对整个足底的压力分布做细致的分析。未来,这样的设置方式 可以为老年人提供跌倒预防和跌倒检测的综合解决方案。

2.2.2 关键点式

图 5(b)是根据正常人的足部结构和足底压力分布选取的 8 个主要受力位置:分别为大脚趾、第一至第五跖骨、中足外侧 和足跟位置^[15]。其他的关键点式布局则以此 8 个位置为基础 进行一定的更改^[19,31-33]。其中,在图 5(b)中的①②⑥和⑧这 4 个位置设置传感器是关键点式的简化方案,在现有研究中应 用较多^[32-34]。

选取关键点设置压力传感器,可以针对性地对大脚趾、跖

骨和足跟部分的压力进行表征,同时需要使用的传感器数量较少,系统更加简单。

2.2.3 简单式

简单式设置方案一般有三种:①第一跖骨、第四五跖骨、后 跟共三个位置^[35-37];②前掌和后跟共两个位置^[26,38-42];③只有 一个位置,一般位于前掌部位^[43]。

简单式放置方案是根据研究者的不同检测思路而设置的, 这样做的优点是降低了系统的复杂度。相对于关键点式而言, 简单式放置方案主要是针对足底前掌和后跟部位进行压力感 知[图 5(c)],这样做的优势在于可以简单地区分行走、跑步和 上、下楼梯等动作,但是会缺少部分区域的信息,不能完整地对 主要受力区域的压力状态进行感知。

从研究文献的数量来看,针对采用大脚趾、第一跖骨、第四 五跖骨和后跟4个位置的关键点式设置以及前掌和后跟两个 位置的简单式设置的研究居多。

2.3 数据采集系统集成

当压力传感器的型号、数量和位置确定好后,还需要配置 其他硬件,包括电源模块、主控芯片模块、数据传输模块等,共 同组成数据采集系统。本文将数据采集系统按从低到高的集 成度分为组合式、简单集成和智能鞋垫三种形式,选取了三个 文献研究中的数据采集系统进行说明(图 6)^[13,29,35]。在实际 研究中,研究人员会根据不同的实验条件和研究思路对数据采 集系统中各个硬件的结合方式进行不同程度的更改。





Fig. 6 Different forms of pressure data collection system 2.3.1 组合式

传感器与鞋子或者鞋垫通常以粘贴的方式结合,其他硬件 在实验过程中需要绑在人体的小腿或者腰部位置。文献[34] 和文献[36]中研究的采集系统为组合式,它的优点是系统简 单、成本低、便于改进;缺点是体积大、便携度低,仅可用于实验 研究。

2.3.2 简单集成

传感器通过塑封等方式集成为一块鞋垫形状的柔性材料, 其他硬件则通过柔性材料与其连接并悬挂或粘贴在鞋子的表 面。文献[42]至文献[44]中研究的采集系统为简单集成的方 式,它的优点是传感器位置固定,便于实验室研究;缺点是集成 度不足、舒适性不高。

2.3.3 智能鞋垫

传感器和其他硬件都集成在鞋垫上,外观与普通鞋垫的差 异不大。文献[16]和文献[30]中研究的采集系统为智能鞋垫, 它优点是集成度高,便携度高;缺点是成本高。

三种数据采集系统可以对应跌倒检测系统的不同研究阶段:研究的早期使用组合式,探究传感器的位置和数量设置;研究的中期则专注于将数据采集系统进行集成,逐步达到人体可穿戴的要求;研究的后期则在满足人体可穿戴要求的基础上,将数据采集系统与数据处理、跌倒检测模型、报警模块更好地组合与完善,逐步满足智能的要求。

从整体来看,与其他类型的传感器数据采集系统相比,基 于可穿戴压力传感器的数据采集系统还需要考虑传感器的放 置位置和数量,以及系统集成方法。目前研究中,传感器的放 置方式以关键点式和简单式居多,系统的集成方法则根据实际 研究条件而采取不同的方式。

3 数据处理(Data processing)

传感器采集到的原始压力数据通常无法直接使用,必须进行数据处理后才可输入算法模型进行跌倒动作判断。数据处理常包括异常数据处理、缺失值处理、滤波处理、归一化处理、简单数据运算及特征值提取等。下文针对足底压力数据处理步骤中应用的特殊方法进行总结和分析。

3.1 数据转换

压力传感器采集到的数据是一个具体的值,不同体重的人 在相同运动状态下的数据存在差异,对于跌倒动作的判断,特 别是阈值的设置有一定的影响。为了排除此影响,BET等^[17] 和 WANG 等^[18]将足底压力数据与站立状态下的压力值转换 为比值,NIE 等^[20]则将足底压力数据转换为与零负载条件下 的电压比。

3.2 分区计算

足部运动状态的获取需要一组传感器对足底不同部位的 压力数据进行测量,在计算一些数据特征(如平均值、均值、方 差等)时,有时需要分区进行计算。此处以平均压力的计算为 例进行说明:①计算整个足底平均压力^[41];②分区域计算平均 压力^[13];③按传感器阵列的排布计算,如按列计算平均 压力^[28]。

3.3 COP与ZMP

压力中心(Center Of Pressure, COP)和零力矩点(the Zero Moment Point, ZMP)的概念相似,当人体处于平衡状态时,ZMP与COP的数值无差异,在人体处于不平衡状态时,二者则显示出不同的特性。

LEE 等^[31]对智能鞋垫上的压力传感器位置做了标准化的 处理,以百分数的形式表征足底压力横向 COP 与纵向 COP,并 使用决策树方法对跌倒进行判断。文献[28]和文献[45]均使 用了零力矩点的方法判断跌倒动作。

3.4 基准压力

将不同姿势下的压力数据作为基准压力,在基准压力的上 下进行姿势区分,将姿势区分引入算法中可以排除一些误报的 情况,如坐下、蹲下等。徐攀峰等^[46]用压力值的大小确定了站 姿基准线和坐姿基准线,区分站姿、坐姿和躺姿三个姿势。

3.5 过零率

过零率(Zero Crossing Rate, ZCR)是指信号通过零点(从 正变为负或从负变为正)的次数。将不同姿势下的基准压力作 为"零点",信号通过基准压力的次数,可以表征一定的运动状 态。强家辉^[14]、石欣^[26]、徐攀峰等^[46]将过零率作为跌倒检测 的特征值。

3.6 步态分析

步态是人的自然行走方式,它是一个复杂的过程,涉及神 经、肌肉和骨骼等多个部分,步态不仅可用于生物识别领域,也 可以用于跌倒检测^[7]。常见的步态参数有步频、步速、步长、步 宽和步态时相等。

石欣^[26]在足底前掌和后跟部位设置压力传感器,设置时 间窗口和基准压力,计算压力数据与压力基准线的坐标并结合 时间等数据提取步频特征、最大步频间隔双足特征等 7 个步态 特征值,利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)的算 法进行跌倒动作判断,平均识别率达到了 90%以上。 MONTANINI等^[35]在足底设置三个压力传感器,将人体活动 时的最大压力值的 1/3 作为阈值,三个压力传感器的模拟信号 可以转换为二进制信息,表征步态周期相位。

整体而言,因为足部位置的特殊性、足底压力与人体运动。 间的联系以及不同个体之间的差异,足底压力数据需要采用一些特殊的处理手段。其中,数据转换和分区计算是多数研究中 会应用的一个数学思想,目的是减少个体差异的影响;强度轰量、COP和ZMP则是通过寻找足底压力各个区域数据的内在 联系表征足部运动;而基准压力、过零率与步态分析通常共同 使用,用于分析人体的步态和姿势。研究者们根据不同的研究 思路采用了不同的处理方法。

4 跌倒检测模型(Fall detection algorithm model)

跌倒检测模型是跌倒检测中数据判断的最后一步,算法模型的构建思路与数据来源紧密相关,模型好坏的最直接体现是 对跌倒动作的检测效果。以下对跌倒检测模型的数据来源、算 法架构及检测准确率进行梳理,再对近几年的跌倒检测模型进 行分析。

4.1 单独判断

石欣等人是国内较早研究单独使用压力传感器进行跌倒 判断的研究团队,在文献[26]、文献[39]和文献[42]中,均使用 双足足底前掌和后跟共 4 个部位的压力传感器采集人体足底 压力数据,并使用 SVM 进行跌倒检测,准确率为 80% ~ 90.73%。强家辉^[14]仅在单足下设置压力传感器,探究实现跌 倒检测的可能性,并使用了 SVM 算法,检测准确率达到 了 94.61%。

与惯性数据一样,单独使用足底压力数据不能对人体运动 做全面且精准的表征,存在准确率低的情况。因此,目前的一 些研究致力于多传感器的数据融合。

4.2 综合分析

从多传感器融合的角度对跌倒进行判断,主要有阈值和机 器学习两种方法。

阈值方法计算简单,检测速度快,功耗小,但无法处理复杂的动作信息,研究者们多使用多级阈值的方法进行跌倒判断。 合加速度判断人体动静状态,倾角判断人体相对于竖直站立时的夹角,足底压力判断双脚与地面的接触情况,由这三个阈值 组成的多级阈值算法整体表现良好,准确率均达到 94%以 上^[40-41]。徐攀峰等^[46]基于足底压力数据,设置了过零点数、方 差、平均值的三级阈值跌倒检测系统,但并未对该系统进行 验证。

机器学习方法可以自动学习特征,准确率相对较高,但模 型训练慢,模型性能对特征和参数的选择依赖度高,容易欠拟 合^[22]。对此,研究者们进行了不同的算法尝试。CHAN 等^[44] 设计了一个包含压力传感器与惯性传感器的智能鞋系统,建立 了卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)和循环 神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)的混合模型用于 检测跌倒动作,F1 分数(F1 Score)达到了 99.8%。卢媛^[38]将 加速度信息、倾角信息和足底压力信息分别输入相关向量机 (Relevance Vector Machine, RVM),根据分类结果和输出的概 率信息建造基本概率分配(Basic Probability Assignment, BPA)函数。再通过 DS 证据理论(Dempster-Shafer Evidence Theory)进行跌倒动作的判断,达到 93.33%的检测准确率。 ^[28] 基于 BP 神经网络、隐马尔科夫模型和多元线性回归 IIA 两级跌倒预警,实验结果显示,该方法对于绊倒和滑倒 动作的检测准确率都达到了 98%以上。

在阈值算法中,压力、加速度、角度的三阈值算法使用者较 ,表现出不低的准确率。机器学习方法中目前则没有较集中的算法应用,并且近年来不同的机器学习算法层出不穷,组合 式的算法模型也不断被开发。

4.3 辅助验证

足底压力在一些研究者的研究中起到特殊的辅助验证作 用,研究者们通常基于足底压力的数据特性对算法做前置判断 或后置验证。前置判断通常是利用阈值过滤一些特定的动作。 石欣等^[39]仅使用足底压力数据,在 SVM 判断前增加了足底压 力方差和平均值的阈值判断,结果显示,阈值判断可以明显降 低误判的可能性,整体准确率在 80%以上。靳少康^[13]在采用 随机森林(Random Forest, RF)算法前,做压力、加速度和时间 的阈值判断,达到了 98.3%的检测准确率。后置验证是对"一 段时间内处于静止躺倒"这一状态进行判别。屠碧琪^[15]提取 了三个足底压力数据特征作为阈值判断标准,先根据加速度数 据判断疑似跌倒动作,再用足底压力的三个特征阈值做最终判 断,正确率达到 99.55%。

辅助验证是跌倒判断中的重要一环,可以减少计算量和误报,特别是对躺倒这一状态做后置验证,能达到较好的效果。

4.4 近年出现的跌倒检测模型

将近年出现的跌倒检测模型连同传感器设置按时间顺序 做了相应的梳理(表 3)。

(1)单独使用压力传感器的算法性能较低,不同传感器数据的融合使用可以提高跌倒检测模型的性能。将文献[19]、文献[45]与其他研究对比可以发现,单独使用足底压力数据做跌倒判断,跌倒模型的整体准确率不高,普遍低于不同传感器的

数据融合的算法性能。

(2)关于多传感器结合的位置设置,"双足+腰部"这样多 点位的设置已经不常见^[13,31,38]。目前主流的做法是在足部放 置压力与惯性传感器^[28-29,44]。将硬件系统集成在鞋子或者鞋 垫中可以大大降低使用者的心理负担和提高系统的便携性。

(3)单独使用阈值方法的研究逐渐减少,阈值方法目前多 起到算法的辅助作用^[13,36-37],跌倒的判断更多的由机器学习方 法实现。同时,研究者们对机器学习算法的选择不一,组合式 的机器学习算法也不断被挖掘^[28-29,44]。

(4)在多传感器结合的算法性能方面,各个研究的整体检测准确率均在93%以上。BP神经网络^[33]、阈值与极端随机树(Extremely Randomized Trees, ET)的组合^[13]获得了最高的检测准确率(99.7%),CNN^[16]、RDAE-LSTM^[29]、BP-HMM^[28]的算法也达到了98.5%以上的准确率。

表 3 近年的跌倒检测模型 Tab.3 Fall detection models in recent years

| 内容 | 传感器设置 | 算法 | 准确度/% |
|--------|--------------------------|------------------|-------|
| 文献[31] | 双足(压力:5);腰(惯性:1) | DT | 95.30 |
| 文献[38] | 双足(压力:2);腰(惯性:1) | RVM | 93.33 |
| 文献[36] | 单足(压力:3+惯性:1) | Threshold | 97.50 |
| 文献[16] | 单足(压力:4+惯性:1) | CNN | 98.61 |
| 文献[37] | 单足(压力:3); 腿(肌电:1) 1 | Threshold, WKFDA | 98.00 |
| 文献[33] | 双足(压力:4+惯性:1) | BPNN | 99.70 |
| 文献[13] | 单足(压力:28); 腰(惯性、气压:1) | Threshold, ET | 99,70 |
| 文献[19] | 双足(压力:6) | KNN | 90.40 |
| 文献[45] | 双足(压力:3) | SVR | 87.78 |
| 文献[29] | 双足(压力:13+惯性:1) | RDAE-LSTM | 98.60 |
| 文献[12] | 双足(压力:3+惯性:1) | ELM | 97.40 |
| 文献[44] | 双足(压力:11+惯性:1) | CNN+RNN | 94.30 |
| 文献[28] | 双足(压力:512+惯性:1) | BP-HMM | 98.50 |

注:"双足"指双足位置均设置了传感器;"惯性"指惯性传感器,包括加速度计、陀螺仪、倾角仪等;数字"n"指该位置布置的传感器数量。

5 结论(Conclusion)

本文首先介绍了应用可穿戴压力传感器进行跌倒检测的 内在原理和基本形式,其次基于跌倒检测模型框架和足底压力 数据特点,对数据采集、数据处理和跌倒检测模型进行了分析 和总结。研究表明,在足底大脚趾、第一跖骨、第四五跖骨和后 跟4个位置以及前掌和后跟2个位置放置FSR402压力传感器 获取双足的压力数据,更能满足跌倒检测对数据的要求;基于 足部的特殊位置以及足部运动和人体状态间的联系,压力数据 有数据转换、分区计算、强度矢量、COP、ZMP、基准压力、过零 率和步态判断等特殊的处理方法;压力传感器与惯性传感器的 融合,以及不同算法之间的融合是目前研究的主流方向。未来 的研究重点在于系统高效集成、成本控制、功耗控制、数据的泛 化性能以及算法的优化设计等。同时,基于智能鞋或智能鞋垫 构建老年人的健康管理系统,提供更加全面的老龄化服务,是 未来研究的一个主要方向。

参考文献(References)

- [1] 国家统计局,国务院第七次全国人口普查领导小组办公室.第七次全国人口普查公报(第五号):人口年龄构成情况[EB/OL]. (2021-05-11)[2023-02-16]. http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901085. html.
- [2] 张聪颖,耳玉亮,叶鹏鹏,等. 2020年中国老年人伤害死亡 特征分析[J]. 中国健康教育,2022,38(11):968-972.
- [3] KARAR M E, SHEHATA H I, REYAD O. A survey of IoT-based fall detection for aiding elderly care; sensors, methods, challenges and future trends[J]. Applied Sciences, 2022, 12(7):3276.
- [4] LIU J W,LI X H,HUANG S S, et al. A review of wearable sensors based fall-related recognition systems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 121:105993.
- [5] 周宇宁,张宏,陈相春,等. 建立足部三维有限元数字模型[J]. 中国组织工程研究,2015,19(5):662-666.
- [6] WANG M, WANG X A, FAN Z C, et al. Research on feature extraction algorithm for plantar pressure image and gait analysis in stroke patients[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2019, 58: 525-531.
- [7] 张峻翼,高昆,谢兵. 步态分析研究综述[J]. 包装工程, 2022,43(10):41-53,14.
- [8] 王姣. 墨于足压与步态分析的运动鞋减震设计研究[D]. 西安:西安理工大学,2022.
- 9] 马露,裴伟,朱永英,等.基于深度学习的跌倒行为识别[J]. 计算机科学,2019,46(9):106-112.
- [0] 忽丽莎,王素贞,陈益强,等.基于可穿戴设备的跌倒检测 算法综述[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(9): 1717-1728.
- [11] 朱连杰,陈正宇,田晨林. 基于可穿戴设备的跌倒检测方 法综述[J]. 计算机工程与应用,2019,55(18):8-14.
- [12] ZHANG M Y, LIU D, WANG Q S, et al. Gait pattern recognition based on plantar pressure signals and acceleration signals [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:1-15.
- [13] 靳少康. 基于可穿戴传感的跌倒检测研究[D]. 保定:河 北大学,2021.
- [14] 强家辉. 基于足底压力感知的跌倒行为检测系统设计[D]. 南京:东南大学,2018.
- [15] 屠碧琪. 基于多传感融合的老人跌倒检测算法研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2017.
- [16] 王岚. 基于多传感器的跌倒检测与预警技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [17] BET P, CASTRO P C, PONTI M A. Fall detection and fall risk assessment in older person using wearable sensors: a systematic review [J]. International Journal of Medical Informatics, 2019, 130:103946.
- [18] WANG X Y, ELLUL J, AZZOPARDI G. Elderly fall detection systems: a literature survey[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2020, 7:71.
- [19] ANDERSON W, CHOFFIN Z, JEONG N, et al. Empiri-

cal study on human movement classification using insole footwear sensor system and machine learning[J]. Sensors,2022,22(7):2743.

- [20] NIE B Q, HUANG R, YAO T, et al. Textile-based wireless pressure sensor array for human-interactive sensing [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(22):1808786.
- [21] ZHANG L,LI H Q,LAI X J,et al. Thiolated graphene@ polyester fabric-based multilayer piezoresistive pressure sensors for detecting human motion [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(48):41784-41792.
- [22] 赵珍珍,董彦如,曹慧,等. 老年人跌倒检测算法的研究现 状[J]. 计算机工程与应用,2022,58(5):50-65.
- [23] DAI Y N, CHEN J L, TIAN W B, et al. A PVDF/Au/ PEN multifunctional flexible human-machine interface for multidimensional sensing and energy harvesting for the Internet of Things[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20 (14):7556-7568.
- [24] WANG L F, JONES D, CHAPMAN G J, et al. A review of wearable sensor systems to monitor plantar loading in the assessment of diabetic foot ulcers[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2020, 67(7): 1989-2004.
- [25] ZHU Y C, WU Y G, WANG G S, et al. A flexible capacitive pressure sensor based on an electrospun polyimide nanofiber membrane [J]. Organic Electronics, 2020, 84:105759.
- [26] 石欣. 基于压力感知步态的运动人体行为识别研究[D] 重庆:重庆大学,2010.
- [27] 王明鑫,俞光荣,陈雁西,等. 正常中国成年人足底压力分析[J]. 中国矫形外科杂志,2008,16(9):687-690.
- [28] JIA X H,LI J R,LIU J Y, et al. Study on abnormal gait and fall warning method using wearable sensors and a human musculoskeletal model[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(6):1-16.
- [29] LIN Z R, WANG Z W, DAI H D et al. Efficient fall detection in four directions based on smart insoles and RDAE-LSTM model [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 205:117661.
- [30] QIAN X Y, CHENG H Y, CHEN D L, et al. The smart insole:a pilot study of fall detection [C]//MUCCHI L, HÄMÄLÄINEN M, JAYOUSI S, et al. Body Area Networks:smart IoT and big data for intelligent health management. Cham:Springer, 2019:37-49.
- [31] LEE C M, PARK J, PARK S, et al. Fall-detection algorithm using plantar pressure and acceleration data[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(4):725-737.
- [32] CATES B, SIM T, HEO H M, et al. A novel detection model and its optimal features to classify falls from lowand high-acceleration activities of daily life using an insole sensor system[J]. Sensors,2018,18(4):1227.

- [33] 刘石雨,王多琎, 一种实时多传感器跌倒检测系统[J]. 软件导刊,2021,20(2):165-169.
- [34] TAN X J,JIN W L,GENG X D, et al. Human fall detection improvement based on artificial neural network and optimized zero moment point algorithms[C]//YE J,LIU Q Q,WEJINYA U, et al. IEEE International Conference on Real-time Computing and Robotics. Piscataway: IEEE,2018:662-666.
- [35] MONTANINI L, DEL CAMPO A, PERLA D, et al. A footwear-based methodology for fall detection[J]. IEEE Sensors Journal,2018,18(3):1233-1242.
- [36] ABANAH SHIRLEY J, SUNDARSINGH E F, SARAS-WATHI V, et al. Fall detection smart-shoe enabled with wireless IoT device [J]. Circuit World, 2021, 47 (4): 325-334.
- [37] XI X G, JIANG W J, LÜ Z, et al. Daily activity monitoring and fall detection based on surface electromyography and plantar pressure[J]. Complexity, 2020, 2020; 9532067.
- [38] 卢媛. 跌倒检测及天位系统关键技术研究[D]. 沈阳:辽 宁大学,2020.
- [39] 石欣,张涛,一种可穿戴式跌倒检测装置设计[J]. 仪器 仪表 常报,2012,33(3):575-580.
- [40] 王鑫. 基于多传感器的跌倒检测方法的研究[D]. 上海: 上海工程技术大学,2017.
- [41] 翟远. 基于多传感器的老年人日常动作识别与跌倒检测研究[D]. 武汉:武汉纺织大学,2017.
- [2] 石欣,熊庆宇,雷璐宁.基于压力传感器的跌倒检测系统研究[J].仪器仪表学报,2010,31(3):715-720.
- [43] KIM I, LEE K S, KIM K, et al. Implementation of a realtime fall detection system for elderly Korean farmers using an insole-integrated sensing device[J]. Instrumentation Science & Technology, 2020, 48(1):22-42.
- [44] CHAN H L,OUYANG Y,CHEN R S,et al. Deep neural network for the detections of fall and physical activities using foot pressures and inertial sensing [J]. Sensors, 2023,23(1):495.
- [45] SI W, TAN R, YANG G L. A novel Internet of Things based fall detection system in smart home[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2022, 37(12):11299-11318.
- [46] 徐攀峰,卢媛,王丽敏. 基于足底压力的跌倒检测定位系 统设计[J]. 辽宁大学学报(自然科学版),2020,47(4): 296-300.

作者简介:

- 郭夭宏(1998-),男,硕士生。研究领域:鞋服数字化与智能化 研究。
- 万蓬勃(1976-),男,硕士,副教授。研究领域:功能性服装服饰 品技术研发,鞋服数字化与智能化研究。
- 石玉娇(1998-),女,硕士生。研究领域:鞋服数字化与智能化研究。